

А. В. Пушин*, Е. С. Белослудцева, А. Э. Свирид**

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН г. Екатеринбург

*avpushin@rambler.ru; **ebelosludceva@mail.ru

СТРУКТУРА, ТЕРМОУПРУГИЕ МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ni-Mn-Al

Методами измерений электросопротивления и микротвердости, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, дифракции рентгеновских лучей исследованы свойства, термоупругие мартенситные превращения (ТМП) и структура сплавов состава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Al}_x$ ($x = 5, 10, 18, 20, 22, 24, 25$). Установлено, что с повышением содержания алюминия понижается температура ТМП, а также изменяется структура мартенсита. Обнаружены мартенситные фазы 2М ($L1_0$) и многослойные 10 М и 14 М, морфология которых преимущественно имеет вид иерархии пакетов когерентных пластин нано- и субмикрорекристаллических кристаллов с границами габитусов близкими $\{110\}_{B2}$.

Ключевые слова: термоупругие мартенситные превращения, фазовый состав, Ni-Mn, мартенсит, электронно-микроскопические исследования.

A. V. Pushin, E. S. Belosludtseva, A. E. Svirid

MICROSTRUCTURE AND THERMOELASTIC MARTENSITE TRANSFORMATIONS IN ALLOYS OF SYSTEMS Ni-Mn-Al

The properties, thermoelastic martensitic transformations (TMT), and the structure of $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Al}_x$ alloys ($x = 5...25$) were studied by the methods of measuring the electrical resistivity and microhardness, transmission and scanning electron microscopy, and X-ray diffraction. Temperature of TMT is found to be decreases with increasing aluminum content, and the structure of martensite changes: 2M ($L1_0$) and multilayered 10M and 14M. Martensite has a hierarchic packet morphology of coherent plates of nano- and submicrocrystalline crystals with habit boundaries close to $\{110\}_{B2}$.

Key words: thermoelastic martensitic transformations, phase composition, Ni-Mn, martensite, electron-microscopic studies.

По определенным, из кривых электросопротивления $\rho(T)$, температурам переходов была построена диаграмма мартенситных превращений, представленная на рис. 1. На данной диаграмме нанесены температурные зависимости мартенситных превращений, а также сверхструктурного фазового упорядочения аустенитных фаз

$B2 \leftrightarrow L2_1$ и перехода сплавов из парамагнитного состояния в антиферро- и ферромагнитное. Фазовый состав сплавов был определен методом РСФА, а также из расшифровки микроэлектронограмм [1–3].

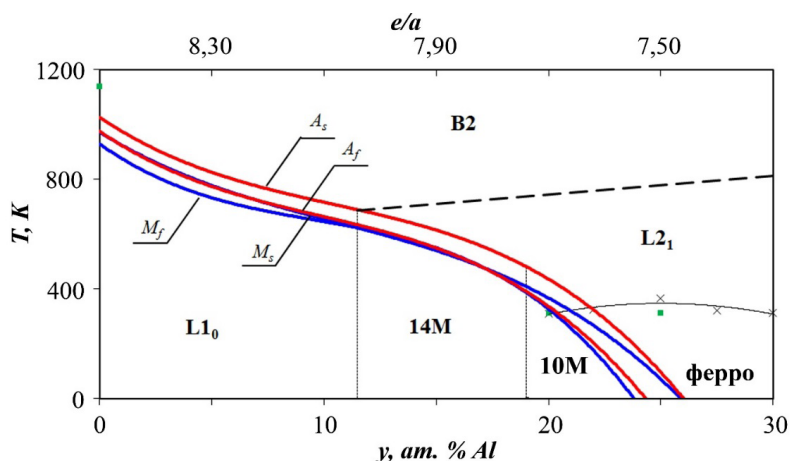


Рис. 1. Фазовая диаграмма мартенситных превращений сплавов $Ni_{50}Mn_{50-x}Al_x$ квазибинарной системы NiMn — NiAl

Из представленной диаграммы следует, что сплавы при увеличении содержания алюминия при комнатной температуре находились в мартенситном состоянии с кристаллической решеткой типа $L1_0(2M)$, 14M и 10M, а сплавы с 24 и 25 ат. % Al — в аустенитном состоянии.

Результаты измерений микротвердости сплавов приведены ниже.

Зависимость микротвердости от химического состава:

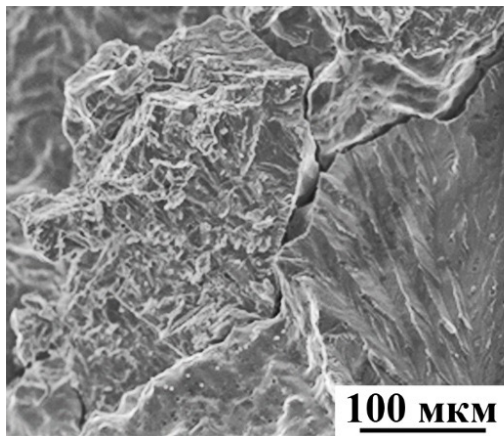
x, ат. % Al	0	10	18	20	22	25
HV, ГПа	4,30	3,52	2,90	3,79	3,79	3,10

При легировании алюминием в пределах 0–18 ат. % понижается сопротивление мартенсита индентору твердомера. Можно заключить, что, находясь в мартенситном состоянии с более низкими модулями упругости, данные сплавы имеют меньшую твердость. Повышение микротвердости в сплавах с 20 и 22 ат. % Al может быть связано, во-первых, с дальнейшей сменой типа кристаллической структуры мартенсита от 14 М к 10 М. Но скорее всего данный факт коррелирует с тем, что критические температуры в данных сплавах близки к комнатной, при которой производились замеры микротвердости. Поэтому повышение микротвердости в сплавах с 20 и 22 ат. % Al может быть связано с наличием двухфазности ($B2+10M$), в т. ч. индуцируемой за счет деформации

при измерении твердости, обеспечивающей дополнительное упрочнение сплавов. В аустенитных сплавах с 24 и 25 ат. % Al тип сверхструктуры изменяется от B2 и L2₁ и микротвердость вновь несколько снижается.

Фрактографическое изучение сплавов было проведено с помощью растровой электронной микроскопии в режиме вторичных электронов после испытаний на изгиб в месте излома для того, чтобы определить характер разрушения. На рис. 2, а, б приведено изображение изломов изучаемых сплавов. Фрактографические исследования изломов показали, что их разрушение происходит как по транскристаллитному (по границам зерен), так и по интеркристаллитному типу (в основном по стыкам пакетов мартенситных кристаллов внутри зерна). Очевидно, что разрушение по границам зерен обусловлено их строением после отжига (рис. 2, а). Интеркристаллитное разрушение происходило как по хрупкому, так и по хрупко-вязкому типу, что, вероятно, зависит от расположения пакетов мартенситных пластин относительно направления распространения трещины разрушения. Если трещина распространяется вдоль плоской границы пакета, то происходит хрупкое разрушение. Такое поведение можно объяснить концентрацией вблизи границ пакетов напряжений, обусловленных реализацией термоупругого мартенситного превращения в определенных областях поликристаллического сплава. Если же трещина развивается под углом к мартенситным пластинам, то в таких областях излом имеет вязкий или хрупковязкий характер (рис. 2, б).

а



б

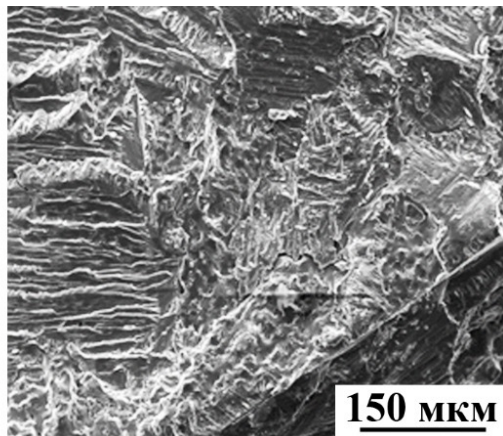


Рис. 2. Фрактографические исследования сплавов:

а — $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{32}\text{Al}_{18}$; б — $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Al}_{20}$

Выводы.

1. Показано, что, при увеличении содержания алюминия в сплавах квазибинарной системы NiMn–NiAl, происходит снижение критических температур термоупругого мартенситного превращения и смена формирования кристаллоструктурного типа кристаллической решетки аустенита и мартенсита в последовательности 2М–14М–10М.
2. Микротвердость исследованных сплавов закономерно изменяется в зависимости от химического состава и структурного типа образующегося мартенсита с определенной субструктурой и морфологией мартенситных кристаллов.
2. Разрушение в исследованных сплавах происходит по транскристаллитному или интеркристаллитному типу. В сплавах трещины транскристаллитного разрушения распространяются как по границам зерен, так и по плоским границам пакетов мартенситных пластин, интеркристаллитное хрупко-вязкое разрушение происходит при распространении трещин по системам сдвига под углом к габитусам мартенситных пластин.

Работа выполнена в рамках Госзадания (шифр «Структура»), г.р. № АААА-А18-118020190116-6, и при поддержке гранта РФФИ 18-32-00529 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Особенности мартенситного превращения и тонкая структура интерметаллического соединения $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ / В. Г. Пушин [и др.] // Материаловедение. 2012. № 11. С. 3–10.
- 2 Высокотемпературный эффект памяти формы и термоупругое мартенситное превращение B2–L1₀ в интерметаллическом соединении NiMn / В. Г. Пушин [и др.] // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 6. С. 104–113.
- 3 Влияние легирования алюминием на структуру, фазовый состав и термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах Ni–Mn–Al / Е. С. Белослудцева [и др.] // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 9. С. 55–59.